УДК 621.928.9

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИСПЕРСНОГО СОСТАВА ПОРОШКОВОГО МАТЕРИАЛА КАСКАДОМ ПРЯМОТОЧНЫХ ЦИКЛОНОВ

А.М. Шиляев, В.С. Рекунов

Томский государственный архитектурно-строительный университет
E-mail: kaf_otopvent@tsuab.ru

При пылевидном сжигании мелкодисперсных твердых топлив, поведение частиц различной крупности в пыле- и золоулавливающих аппаратах неодинаково. Для обоснованного выбора и правильной оценки работы систем газоочистки необходимы сведения о дисперсном составе подлежащего улавливанию продукта. Разработана методика, позволяющая оперативно вычислять фракционный состав порошков. Проведено сравнение полученных результатов с данными дисперсного анализа, полученных другим методом. Получено устойчивое решение, показавшее, что методикой можно пользоваться при определении дисперсности пылей от 10 до 50 мкм.

При факельном сжигании измельченного твердого топлива в теплогенерирующих установках промышленных предприятий различного профиля на стадиях подготовки, пневмотранспорта пылевидного топлива, а также на участках золоочистки дымовых газов при диагностике и настройке технологического и пылеулавливающего оборудования необходим оперативный контроль фракционного состава содержащегося в газах дисперсного материала. Существуют различные методы определения дисперсного состава порошковых материалов [1, 2], однако, все эти методы требуют проведения предварительной подготовки проб порошка. На основе экспериментального исследования эффективности пылеулавливания каскадом прямоточных циклонов и анализа работы этих аппаратов разработан новый метод дисперсного анализа порошковых материалов с использованием последовательно установленных прямоточных циклонов и расшифровкой результатов пылеулавливания решением обратной коэффициентной задачи при непосредственном отборе пылегазовой смеси от технологического оборудования.

Метод последовательно установленных противоточных циклонов разработан С.С. Янковским и Н.А. Фуксом [2]. Он не требует предварительного осаждения исследуемой пыли и позволяет производить дисперсный анализ порошка непосредственно при улавливании частиц из пылегазового потока. В [2] представлены номограммы выносов пыли и параметры, при которых была проведена градуировка противоточных циклонов. При пылеулавливании на других скоростях газа в циклонах или при другой плотности пыли необходима дополнительная градуировка установки и пересчет результатов опыта на действительную плотность порошкового материала, что, в свою очередь, приводит к неточности определения дисперсного состава пыли и требует дополнительного времени для получения результатов. В настоящей работе разработан метод определения дисперсного состава пыли при помощи трех последовательно установленных прямоточных циклонов, который позволяет проводить дисперсный анализ порошков при любой его плотности и без построения номограмм [3].

Суть метода заключается в следующем. Пылегазовый поток исследуемого порошка пропускают через каскад из трех последовательно соединенных циклонов и фильтр, и по разности весов бункеров и фильтра до и после опыта, определяется масса уловленного порошка каждым циклоном и фильтром. Предварительно определяется плотность исследуемого порошка.

Суммарный проскок пыли в каскаде $K_{\Sigma_{123}}$ определялся как отношение массы задержанной фильтром пыли $\Delta G_{m\phi}$, равной разности весов фильтра после опыта $G_{\phi 2}$ и до опыта $G_{\phi 1}$, к массе пропущенного через циклон за время опыта порошкового материала, который можно принять как сумму весов порошка, уловленного каждым циклоном ΔG_{m1}, ΔG_{m2}, ΔG_{m3} и фильтром $\Delta G_{m\phi}$. Так что

$$K_{\Sigma_{123}} = \frac{\Delta G_{m\phi}}{\Delta G_{m_1} + \Delta G_{m_2} + \Delta G_{m_3} + \Delta G_{m_\phi}}.$$

Полный коэффициент проскока первого, второго и третьего циклона, установленного в каскад, определялся по формулам

$$K_{\Sigma_1} = \frac{\Delta G_{m_2} + \Delta G_{m_3} + \Delta G_{m_\phi}}{\Delta G_{m_1} + \Delta G_{m_2} + \Delta G_{m_3} + \Delta G_{m_\phi}},$$

$$K_{\Sigma_2} = \frac{\Delta G_{m_3} + \Delta G_{m_\phi}}{\Delta G_{m_2} + \Delta G_{m_3} + \Delta G_{m_\phi}}, \quad K_{\Sigma_3} = \frac{\Delta G_{m_\phi}}{\Delta G_{m_3} + \Delta G_{m_\phi}}.$$

Полная эффективность пылеулавливания j-го циклона в каскаде η_{Σ_j} определялась из соотношения

$$\eta_{\Sigma_j} = 1 - K_{\Sigma_j}.$$

Данные о расходной скорости пылегазового потока, плотности порошкового материала, динамической вязкости газа, диаметре прямоточных циклонов и общих эффективностях пылеулавливания прямоточными циклонами вводят в ЭВМ.

Определение фракционного состава порошка, пропускаемого через каскад двух циклонов [4], заключается в нахождении симплексным методом поиска минимума функционала J, представляющего собой сумму квадратов разностей эффективностей пылеулавливания

$$J = \sum_{i=1}^{q} \sum_{j=1}^{3} (\eta_{p_j} - \eta_{\Sigma_j})^2 \to 0, \qquad (1)$$

где q – число скоростей в эксперименте; η_{p_j} – расчетные значения эффективностей пылеулавливания j-ми циклонами в каскаде, вычисляемые по формуле

$$\eta_{p_j} = 1 - \int_0^\infty g_0(\delta) \prod_{j=1}^{3} K_{\delta_j} d\delta, \qquad (2)$$

где $g_0(\delta)$ – весовая дифференциальная функция распределения частиц по размерам, для описания которой используется логарифмически нормальный закон [5], справедливый для многих промышленных пылей

$$g_0(\delta) = \frac{1}{\delta\sqrt{2\pi}\ln\sigma} \cdot e^{-\frac{(\ln\delta - \ln\delta_{50})^2}{2\ln^2\sigma}}, \qquad (3)$$

δ – текущий размер частиц, мкм; σ – дисперсия; δ_{50} – масс-медианный размер частицы, мкм; K_{δ_j} – фракционный коэффициент проскока пыли j-го прямоточного циклона в каскаде, который определяется зависимостью [6]

$$K_\delta = e^{-A_{\text{пц}}\text{Stk}^N}, \qquad (4)$$

где $A_{\text{пц}}$ – опытный коэффициент, который необходимо определить. Этот коэффициент следует подбирать из условия равенства расчетного и экспериментального значения интегрального коэффициента проскока с последующим осреднением полученных результатов по всем опытным точкам; $\text{Stk} = \tau V_0/d_0$ – инерционное число Стокса; $\tau = \rho_m \delta^2/18\mu$ – время динамической релаксации частиц размером δ; ρ_m – плотность частицы; μ – динамическая вязкость очищаемого газа; V_0, d_0 – скорость потока газа и диаметр циклона соответственно.

Показатель степени числа Стокса N задавался соотношением [6]:

$$N = \frac{n+1}{2(2-n)}. \qquad (5)$$

где n – константа в законе сопротивления частиц

$$\xi = \frac{A}{\text{Re}_\delta^n}, \qquad (6)$$

где Re_δ – число Рейнольдса обтекания частицы во вращающемся газовом потоке в [6] определялось зависимостью

$$\text{Re}_\delta = \left(\frac{48}{A} \sqrt{18 \frac{\rho}{\rho_m} \text{Re} \cdot \text{Stk}^3} \right)^{\frac{1}{2-n}}, \qquad (7)$$

где A – константа в законе сопротивления частиц (6); ρ – плотность газа; $\text{Re} = V_0 d_0/\nu$ – число Рейнольдса; ν – коэффициент кинематической вязкости газа.

Анализ экспериментальных данных показал, что частицы размером более 20 мкм улавливаются циклоном практически полностью и выбор закона сопротивления для них не имеет значения, а для частиц с размерами от 5 до 20 мкм решение ур. (7) дает диапазон чисел Рейнольдса обтекания частицы Re_δ от 1 до 10, для которого коэффициент сопротивления частиц в потоке (6) можно рассчитывать при константах A=26,3 и n=0,8. Следовательно, для этих условий, согласно соотношению (5), получим

$$N = \frac{0,8+1}{2(2-0,8)} = 0,75.$$

Таким образом, по опытным интегральным значениям K_Σ восстанавливалась зависимость для фракционного коэффициента проскока

$$\eta_\Sigma = 1 - \int_0^\infty K_\delta g_0(\delta) d\delta,$$

где фракционный проскок K_δ, определяется по формуле (4). Значит, для каждого прямоточного циклона в каскаде необходимо определить только по одной константе $A_{\text{пц}}$. При пересчете учитыва-

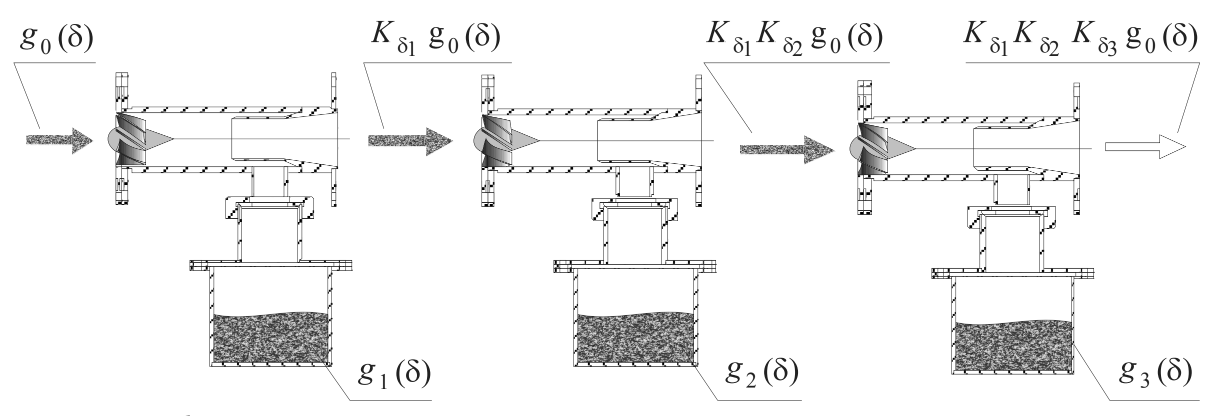


Рис. 1. *Схема работы каскада прямоточных циклонов*

лось влияние повышенной концентрации частиц в потоке газа на эффективность пылеулавливания, имеющей место при проведении экспериментов, согласно зависимости [5]

$$K_{\Sigma} = \frac{K_{\Sigma э}}{1 + 1,2 \cdot 10^{-3} Z_{вх} \lg(0,1 Z_{вх})},$$

где $K_{\Sigma э}$ – экспериментальное значение коэффициента проскока при повышенной общей концентрации частиц пыли на входе в аппарат $Z_{вх}$, г/м³.

Работа единичного циклона может быть описана экспоненциальной зависимостью фракционного коэффициента проскока от инерционного числа Стокса [7, 8] (4). При известных опытных константах в этой формуле, каскад циклонов может быть использован как устройство для определения фракционного состава пыли.

Работу каскада прямоточных циклонов можно представить следующим образом (рис. 1). В первый аппарат каскада поступает пыль с известным распределением частиц по размерам $g_0(\delta)$, например, для логарифмически нормального закона распределения (3), известными величинами должны быть δ_{50} и σ.

Масс-медианный размер для нормированной на единицу функции распределения частиц по размерам $g_0(\delta)$ вводится по [5]

$$\int_0^{\delta_{50}} g_0(\delta) d\delta = \frac{1}{2} \text{ или } \int_{\delta_{50}}^{\infty} g_0(\delta) d\delta = \frac{1}{2}.$$

Дисперсия для логарифмически нормального закона распределения частиц по размерам может быть определена из соотношений

$$\sigma = \frac{\delta_{50}}{\delta_{16}} \text{ или } \sigma = \frac{\delta_{84}}{\delta_{50}},$$

где δ_{16} и δ_{84} определяются по [5]

$$\int_0^{\delta_{16}} g_0(\delta) d\delta = 0,16 \text{ и } \int_0^{\delta_{84}} g_0(\delta) d\delta = 0,84.$$

Первый циклон в каскаде улавливает пыль с эффективностью

$$\eta_{\Sigma_1} = 1 - \int_0^{\infty} K_{\delta_1} g_0(\delta) d\delta,$$

где K_{δ_1} рассчитывается по формуле (4), при этом, в бункере первого циклона уловленная пыль должна иметь распределение $g_1(\delta)$, а упущенная циклоном – $K_{\delta_1} g_0(\delta)$.

При известных K_{δ_1} и $g_0(\delta)$ можно определить

$$g_1(\delta) = (1 - K_{\delta_1}) g_0(\delta).$$

Таким образом, во второй циклон поступает пыль с распределением равным $K_{\delta_1} g_0(\delta)$, а в его бункере должна находиться пыль с распределением

$$g_2(\delta) = (1 - K_{\delta_2}) K_{\delta_1} g(\delta).$$

Зная распределение частиц по размерам в исходной пыли $g_0(\delta)$ и вид функции фракционного коэффициента проскока K_{δ_i} и интегральные эффективности пылеулавливания единичными циклонами в каскаде (4) полученные опытным путем, можно подобрать константы $A_{пц_i}$ для фракционного коэффициента проскока каждого циклона в каскаде.

По изложенной методике составлена программа «Dispersion», которая подверглась тестированию на искусственно сгенерированных параметрах пыли. Погрешность поиска не превышала 0,1 %. Восстановленные фракционные коэффициенты проскока единичных прямоточных циклонов, установленных последовательно в каскад, и фракционный состав поступившей и уловленной отдельными циклонами пыли, показаны на рис. 2 и 3.

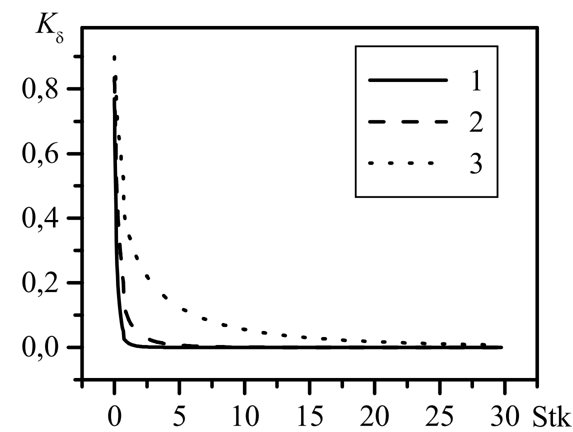


Рис. 2. *Фракционные коэффициенты проскока циклонов в каскаде: 1) K_{δ_1}; 2) K_{δ_2}; 3) K_{δ_3}*

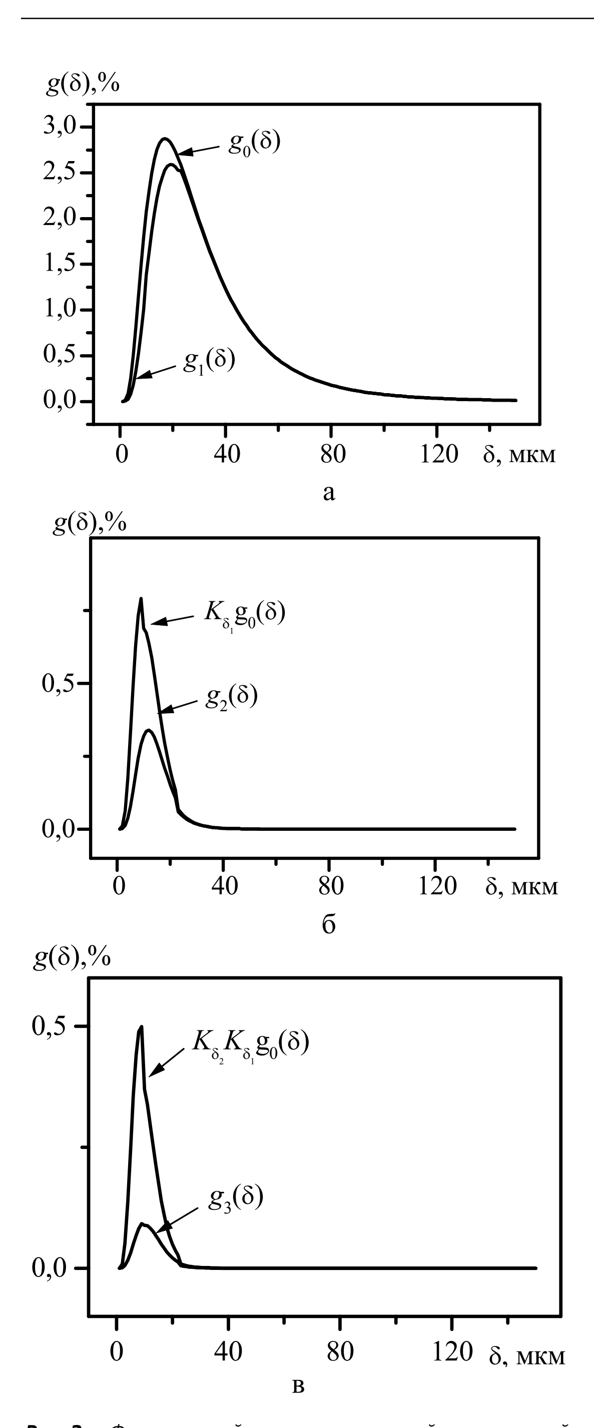


Рис. 3. *Фракционный состав поступившей и уловленной пыли. Циклоны: а) первый; б) второй; в) третий*

Для описания исследуемого порошка зависимостью (3) необходимо знать две константы: δ_{50} и σ. Значение этих величин следует подбирать в формуле (2) устремляя функционал (1) к нулю. Причем, для решения задачи, т. е. определение двух констант в логарифмически нормальном законе распределения частиц исследуемого материала по размерам, достаточно использовать два прямоточных циклона. Использование третьего пылеуловителя в каскаде повышает точность получаемого результата. Осуществить автоматически поиск можно, например, симплексным методом Нелдера-Мида [9].

Идея метода состоит в сравнении значений функции в (z+1) вершинах симплекса и перемещении симплекса в направлении оптимальной точки с помощью итерационной процедуры. В симплексном методе, предложенном первоначально, регулярный симплекс использовался на каждом этапе. Нелдер и Мид предложили несколько модификаций этого метода. В результате получился очень надежный метод прямого поиска, являющейся одним из самых эффективных, если $z \le 6$. Симплекс перемещается с помощью трех основных операций: отражения; растяжения и сжатия. Коэффициенты отражения, растяжения и сжатия рекомендуется принимать α=1, β=0,5 и γ=2 соответственно. Рекомендации основаны на результатах экспериментов с различными комбинациями значений. Эти значения параметров позволяют методу быть эффективным и надежно работать в различных сложных ситуациях.

Разработанная программа «Dispersion» была использована для определения логарифмически нормального закона распределения частиц по размерам модельной кварцевой пыли с параметрами δ_{50}=26,16 мкм, σ=1,93, ρ_m=2650 кг/м^3. Параметры пыли получены методом трех последовательно установленных прямоточных циклонов диаметром d_0=0,046 м с 8-ми лопаточным импеллером с углом наклона лопаток 45° к оси циклона. Время помола кварцевого песка подбиралось из условия обеспечения дисперсности получаемого порошка близкой к дисперсности золоуноса при сжигании каменных углей в пылевидном состоянии в вихревых топках тепловых станций. Результаты численных поисков представлены на рис. 4, где $D(\delta)$ – интегральная функция логарифмически нормального закона распределения частиц по размерам δ.

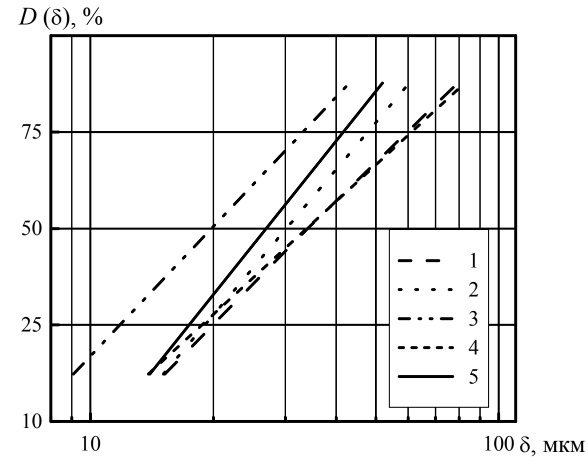


Рис. 4. *Распределение частиц по размерам модельной пыли при V_0, м/с: 1) 6,0; 2) 7,0; 3) 8,0; 4) 10,0; 5) параметры определены методом жидкостной седиментации*

Разброс расшифрованных параметров модельной пыли объясняется невысокой стабильностью работы циклонов в лабораторном каскаде. Обратная задача, реализованная в программе «Dispersion», относится к классу некорректных, для которых условие устойчивости может не выполняться, т. е. по-

грешности в исходных данных могут привести к непропорциональному увеличению ошибки. В интервале скоростей газа в циклонах от 6,0 до 11,0 м/с при расшифровке фракционного состава порошка получено устойчивое решение, рис. 4. Данной методикой можно пользоваться при определении дисперсного состава пылей для оперативного контроля режимов работы теплоэнергетического оборудования.

Каскад трех прямоточных циклонов, используется для определения дисперсного состава твердых порошковых материалов на заводе ДСП ООО «Томлесдрев» г. Томска, для контроля за пылевыми выбросами в ООО «Сибпромвентиляция» г. Томск и для определения фракционного состава пылевых выбросов в сушильных установках ЗАО «Томский завод керамических материалов и изделий».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коузов П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов. – Л.: Химия, 1974. – 280 с.
2. Коузов П.А., Скрябина Л.Я. Методы определения физико-химических свойств промышленных пылей. – Л.: Химия, 1983. – 143 с.
3. Пат. 2273019 РФ. МПК^7 G01N 15/02. Способ определения дисперсного состава порошковых материалов / М.И. Шиляев, А.М. Шиляев, В.С. Рекунов и др. Заявл. 05.10.00; опубл. 27.03.06. Бюл. № 9 (II ч) – 11 с.: ил.
4. Шиляев А.М., Рекунов В.С., Наумкин А.Б. К методу последовательно установленных циклончиков определения фракционного состава порошков // Архитектура и строительство. Наука, образование, технологии, рынок: Тез. докл. Междунар. научно-техн. конф. 11–12 сент. 2002 г.: Секция «Создание высококачественных строительных материалов и изделий, разработка ресурсосберегающих, экологически безопасных технологий в стройиндустрии». – Томск: Изд-во ТГАСУ, 2002. – С. 87—88.
5. Справочник по пыле- и золоулавливанию / Под общ. ред. А.А. Русанова. – М.: Энергия, 1975. – 296 с.
6. Шиляев А.М., Рекунов В.С. Применение уравнения конвективной диффузии для расчета процесса выделения частиц пыли из турбулентного потока газа в прямоточном циклоне // XIV Школа-семинар молодых ученых и специалистов под руководством акад. РАН А.И. Леонтьева. – Рыбинск, 2003. – С. 335–338.
7. Шиляев М.И., Дорохов А.Р. Методы расчета и принципы компоновки пылеулавливающего оборудования. – Томск: Изд-во ТГАСУ, 1999. – 209 с.
8. Шиляев М.И. и др. Энергетический принцип сопоставления и компоновки пылеулавливающего оборудования. Очистка и обезвреживание дымовых газов из установок, сжигающих отходы и мусор // Сб. научно-техн. статей. – Новосибирск: Институт теплофизики СО РАН, 1999. – С. 167–179.
9. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс. – М.: Радио и связь, 1988. – 128 с.

Поступила 30.11.2006 г.

УДК 661.181.12:662.73 / 74.001.5